

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN RESSOURCES RENOUVELABLES

PAR
CHARLES-AUGUSTIN DÉRY BOUCHARD
B.Sc.

LA CROISSANCE ET LA QUALITÉ DES TIGES D'ÉPINETTE NOIRE ET DE PIN
GRIS EN PLANTATION

NOVEMBRE 2014

RÉSUMÉ

Les plantations d'épinette noire et de pin gris sont utilisées à grande échelle au Québec afin de pallier aux problèmes de régénération naturelle. Plusieurs études démontrent qu'en plantation il est possible d'observer une meilleure croissance qu'en régénération naturelle. Par contre, ce gain de croissance serait accompagné d'altération dans la qualité du bois. L'objectif principal de cette étude est d'établir le rendement des plantations de pin gris et d'épinette noire en forêt boréale, en incluant des paramètres caractérisant la qualité du bois, tel que : le bois de compression, la déviation des tiges, et la longueur des trachéides. Cette étude couvre une grande zone au nord de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Dix plantations de pin gris et dix d'épinette noire, âgée entre 17 et 25 ans, ont été échantillonnées. Les résultats démontrent que le pin gris obtient une croissance en volume et en hauteur supérieure et plus rapide que l'épinette noire. Les épinettes noires présentent des tiges ayant moins de déviations que les pins gris. Le pourcentage de bois de compression est plus élevé chez les pins gris surtout à la base de la tige. De plus, il est possible d'observer une relation positive entre la déviation des pins gris de leur axe vertical et la présence élevée du bois de compression. La longueur des trachéides augmente avec le temps et elles sont plus longues chez le pin gris que l'épinette noire. Globalement, le pin gris possède des avantages, car malgré les déviations des tiges et une occurrence de bois de compression plus élevée, la croissance rapide et la longueur des trachéides sont des atouts majeurs pour cette espèce.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, merci à Cornelia pour ton soutien constant au long de toutes ces années. Tu as su me faire confiance et m'as encouragé sans relâche. Merci, de tout coeur, à ma famille, mes amis et ma copine qui m'ont supporté (dans tous les sens du terme) indéfectiblement durant ces années importantes. Merci à Pierre-Yves Plourde pour son aide précieuse. Merci aussi à Mireille Bouliane, Émilie Pamerleau, Audrey Lemay, Mélanie Bouchard, Marie-Josée Tremblay, Pascal Lapointe, Pascal Tremblay, Winna H. Landry et Mathieu Gélinas. Vous m'avez tous apporté votre aide et m'avez fourni les encouragements dont j'avais besoin. À vous tous, merci!

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES FORMULES	x
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 OBJECTIFS.....	8
1.2 HYPOTHÈSES.....	8
2. MÉTHODOLOGIE	10
2.1 AIRE D'ÉTUDE ET CARACTÉRISTIQUES DES SITES.....	10
2.2 ÉCHANTILLONAGE ET TRAITEMENT DES DONNÉES	12
2.2.1 Croissance et accroissement en volume	12
2.2.2 Paramètres de la qualité du bois	15
2.2.2.1 Écart vertical	15
2.2.2.2 La longueur des trachéides	16
2.3 TRAITEMENT STATISTIQUE	19
3. RÉSULTATS	20
3.1 CROISSANCE	20
3.1.1 La croissance radiale	20
3.1.2 La croissance en hauteur	22
3.1.3 La croissance en volume	23
3.2 QUALITÉ DU BOIS.....	24
3.2.1 Écarts verticaux des tiges	24
3.2.3 Bois de compression	27
3.2.2 La longueur des trachéides	30
4. DISCUSSION	32
4.1 LA CROISSANCE.....	32
4.2 LA QUALITÉ.....	38

4.2.1 Les écarts verticaux et le bois de compression.....	38
4.2.3 La longueur des trachéides	42
5. CONCLUSION.....	45
6. RÉFÉRENCES.....	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Localisation et caractérisation des sites d'études.....	11
Tableau 2. Analyse de variance à mesures répétées de la croissance radiale, en hauteur et en volume des deux espèces, par année d'âge cambial.....	21
Tableau 3. Analyse de variance des régressions de la hauteur et du dhp avec les écarts verticaux et le bois de compression des deux espèces.....	25
Tableau 4. Analyse de variance de la longueur moyenne des trachéïdes du bois initial et final, des deux espèces, par année d'âge cambial.....	31
Tableau 5. Résultats adaptés de différentes études mesurant la croissance en volume, pour différentes espèces, en plantations.....	35

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Emplacement des sites à l'étude.....	11
Figure 2. Schématisation du prélèvement des échantillons des arbres. À chaque mètre, à partir de la base, les rondelles sont récoltées en plus de la rondelle 0,5 m et 1,3 m.....	12
Figure 3. Mesure de l'écart vertical des tiges à l'aide d'une planche de référence mise au niveau.....	15
Figure 4. Les cernes d'intérêts sont prélevés (âge cambial 4, 8, 12, 16), à l'aide d'un binoculaire et d'une lame de rasoir. Le bois initial et le bois final des cernes d'intérêt ont été séparés.....	17
Figure 5. Schématisation des effectifs des plantations en fonction de l'âge cambial avec un nombre stable d'individus jusqu'à 17 ans.....	19
Figure 6. Croissance radiale moyenne de <i>Picea mariana</i> en mm et <i>Pinus banksiana</i> par année d'âge cambial.....	21

Figure 7. Croissance en hauteur annuelle et cumulée de <i>Picea mariana</i> en mètre et <i>Pinus banksiana</i> par année d'âge cambial.....	22
Figure 8. Croissance en volume annuel et cumulé de <i>Picea mariana</i> et <i>Pinus banksiana</i> par année d'âge cambial.....	23
Figure 9. Pourcentage des tiges dominantes de <i>Picea mariana</i> et <i>Pinus banksiana</i> par catégorie d'écart vertical.....	25
Figure 10. Régressions comparant la hauteur, le dhp de <i>Picea mariana</i> et <i>Pinus banksiana</i> , avec le log des écarts verticaux.....	26
Figure 11. Taux moyen de bois de compression de <i>Picea mariana</i> et <i>Pinus banksiana</i> par année d'âge cambial.....	27
Figure 12. Taux moyen de bois de compression de <i>Picea mariana</i> en pour cent et <i>Pinus banksiana</i> par hauteur relative.....	29
Figure 13. Régressions comparant la hauteur de <i>Picea mariana</i> et <i>Pinus banksiana</i> , avec le pourcentage de bois de compression.....	29

Figure 14. Longueur moyenne des trachéides du bois initial et final de <i>Picea mariana</i> et <i>Pinus banksiana</i> par âge cambial.....	30
---	----

Figure 15. Volumes par hectare de différentes études portant sur les plantations dans l'est du Canada.....	35
---	----

LISTE DES FORMULES

Formule 1. Rayon moyen d'une rondelle.....	12
Formule 2. Volume du cône tronqué.....	12
Formule 3. Volume d'un arbre.....	12
Formule 4. Pourcentage de bois de compression.....	16

1. INTRODUCTION

De nos jours, en foresterie, les plantations sont une composante majeure de l'économie mondiale. On estime qu'à l'échelle mondiale, plus de 35 % du bois utilisé à des fins commerciales provient de plantations (Lafond 2008). Ce chiffre devrait dépasser les 75 % vers l'an 2050 (Lafond 2008). Au Québec, la forêt boréale occupe une très grande superficie c'est-à-dire plus de 106 millions d'hectares, ce qui représente environ 70 % du territoire provincial (BFC 2013). Par conséquent, les activités forestières du Québec sont une partie non négligeable de son économie avec plus de 90 000 emplois qui lui sont reliés (MRN 2013*a*). De plus, depuis 1987, toutes compagnies exploitant la forêt se doivent de reboiser l'équivalent de la superficie prélevée (MRN 2013*b*). Ce qui engendre un reboisement constant de la forêt québécoise. Ainsi, de nos jours, plus de 140 M de plants sont mis en terre annuellement au Québec. Étant donné que le reboisement est une pratique sylvicole plutôt récente, la majorité de ces plantations sont plus jeunes que vingt ans, ce qui explique le manque de connaissance concernant les caractéristiques de croissance et de qualité du bois des plantations, en forêt boréale et plus particulièrement dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, Québec, Canada.

Voici en guise d'introduction un bref historique des plantations dans le monde. Cet historique nous mènera graduellement à la foresterie moderne et aux plantations québécoises, particulièrement celles de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Le tout pour introduire la question qui est l'objet d'étude du présent document soit : la croissance de

l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) et du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb) en plantations et l'évaluation de divers paramètres de la qualité du bois.

Dans le monde, il n'est pas aisé de trouver un point de commencement à l'histoire des plantations. Il est toutefois possible de commencer avec celui qui peut être décrit comme le père du reboisement: Jean Batiste Colbert (1619-1683). Il administrait la forêt française dans les années 1660 (Krech *et al.* 2004). Sous Colbert, on vit entre autres la fondation de l'Académie des sciences. Son Ordonnance des Eaux et Forêts, qui fut promulguée en 1669 a amené la plantation à grande échelle de forêts de chênes avec un objectif à long terme, assuré l'approvisionnement que nécessite la construction de navires de guerre. Le travail de Jean Batiste Colbert est de loin le plus considérable et méthodique pour son époque. Il envoya les membres de son équipe afin d'estimer sommairement la possibilité forestière sur tout le territoire français. Ces équipes sont revenues avec des preuves d'une réduction de la possibilité forestière. C'est ce qui a poussé la monarchie à financer ces travaux de reboisement jusqu'à la Révolution française, plus de cent ans plus tard (Krech *et al.* 2004).

Tôt dans l'histoire de la colonisation de la nouvelle France, l'autorité de l'époque s'est intéressée aux forêts de chênes comme celle de l'île de Montréal (Bouchard 2011). Ce type de bois était parfait pour l'usage de construction navale. Les colons avaient besoin de terres agricoles, de bois de construction et de bois de chauffage. Le pin et le chêne ont donc fait l'objet d'un abattage soutenu. Un des premiers décrets concernant la foresterie au

Québec est celui de l'intendant Talon en 1672 concernant la réglementation sur l'abattage du chêne. À cette époque, beaucoup de bateaux, vidés de ces colons, repartaient en Europe la cale pleine de chêne ou de pin (Porter et Hecht 2010). Rapidement, les inquiétudes sur la déforestation des royaumes suscitèrent des publications comme celle de John Evelyn (1620-1706) : "discours sur la forêt et sa progression sur les terres de Sa Majesté". La plus grande inquiétude de l'époque était la pénurie de bois pour la construction des navires. Le régime anglais en Nouvelle-France fût marqué par la coupe forestière destinée aux navires de guerre, l'arrivée des grandes compagnies comme Price et l'apparition des grands journaux qui nécessitent de la pâte de papier (Bouchard 2011).

C'est avec Bernhard E. Fernows (1851-1923) que débuta la science forestière en Amérique de Nord. Il fonda l'école de foresterie de Toronto et possédait une philosophie innovatrice de la forêt en prônant : "Forestry is buisness!" (Bouchard 2011). Son discours a mis en évidence la valeur de la forêt boréale pour la production de pâte de papier. C'est le début de l'industrialisation du Québec par la foresterie alimentée par les besoins en papier de l'Amérique et de l'Angleterre. Vers la fin du 19^e siècle, le reboisement est utilisé au Québec surtout pour regarnir les paysages dénudés par une colonisation dite "hâtive et maladroite" (Dancause 2008). Henry-Gustave Joly de Lotbinière fonde en 1872 la société de reboisement de la province de Québec, car déjà à cette époque plusieurs personnes sont inquiètes par la disparition des forêts. C'est en 1907 que Gustave Clodimir Piché fonde la première pépinière au Québec. Avant 1940, le reboisement dans la province était un

traitement utilisé de façon marginale. Même entre 1940 et 1970, le nombre de plants forestiers mis en terre ne dépasse pas les 3 millions par année.

C'est seulement vers le début des années 70 que le reboisement deviendra une pratique sylvicole de plus en plus utilisée à grande échelle. Entre 1970 et 1985, environ 50 millions de plants furent mis en terre annuellement. Ils étaient cultivés à racines nues et produits exclusivement dans les pépinières forestières gouvernementales. C'est une époque marquée par les premiers essais de production de plants en récipients, par l'amélioration de la qualité des semences et des techniques de production des plants ainsi qu'à l'intensification du reboisement (Lafond 2008). En 1983, le gouvernement annonce un nouveau programme de reboisement ayant pour objectif de constituer un stock ligneux pour l'avenir et de reboiser 40 % des zones non ou mal régénérées. Ce qui mènera à l'établissement du programme de vergers à graines pour la majorité des zones écologiques du Québec. Entre 1985 et 1992, le rythme de production de plants s'accroît et est à l'origine de la création de 25 pépinières privées, de cultures en récipients et du renouvellement et de l'expansion des infrastructures des pépinières publiques, de même que la création de centres de semences forestières et bouturage (Dancause 2008). En avril 1987, la Loi sur les forêts imposa l'obligation d'établir une régénération adéquate dans les cinq années suivant une coupe sur toutes les superficies récoltées (Dancause 2008). Tout propriétaire d'un contrat d'approvisionnement et d'aménagement forestier (CAAF) devrait s'y soumettre. Cela explique donc l'énorme production de plants (plus de 250 millions) produit au Québec en l'année 1989 (MRN 2013*b*). Au fil du temps, grâce entre autres à la remise en

production de peuplements, de nouvelles techniques sylvicoles orientées vers la protection de la régénération, ainsi que l'utilisation de plants génétiquement modifiés, la production de plants diminue (Dancause 2008). En 1994, la Stratégie de protection des forêts, qui était fortement contestée, impose l'arrêt de l'utilisation des phytocides chimiques en foresterie dès l'année 2001. L'amélioration du rendement des plantations devra maintenant passer par l'utilisation de plants de fortes dimensions, le reboisement hâtif et le dégagement mécanique (Dancause 2008).

La région administrative du Saguenay-Lac-Saint-Jean est la première région en importance, au niveau provincial pour la production de matière ligneuse. Cette région représente à elle seule 23 % de la possibilité forestière québécoise (MRN 2009). Une région ayant une telle activité forestière se doit donc d'avoir une activité de reboisement sensiblement équivalente. Pour cette région seulement, le Ministère des ressources naturelles a pour objectif d'effectuer la plantation de plus de 50 millions de plants par année (Murray 2014).

Par conséquent, le reboisement est un des traitements sylvicoles le plus utilisé au Québec, car il sert à pallier aux problèmes de régénération naturelle (Krause et Plourde 2008). Ces problèmes peuvent être causés dépendamment des espèces par : le feu (Sirois et Payette 1989), la coupe forestière elle-même (Lussier *et al.* 2002) ou encore par les épidémies d'insectes (Krause *et al.* 2009). Une majorité des semis utilisés pour le reboisement en forêt boréale sont des plants d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) et de pin gris (*Pinus banksiana* (Lamb.)) (MRN 2013b). L'épinette noire est bien adaptée

au feu (Gagnon *et al.* 2001). Par contre, des problèmes de régénération ont été observés chez cette espèce (Girard 2008). Ceux-ci peuvent être causés par des feux trop fréquents dans des peuplements n'ayant pas atteint leurs maturités (Payette et Fillion 2010). De plus, si un feu survient rapidement après une coupe forestière, ou encore une épidémie de tordeuse du bourgeon d'épinette, des problèmes de régénération peuvent survenir (Gagnon *et al.* 2001). Le pin gris quant à lui est très bien adapté au feu (Zhang et Koubaa 2009). Le feu provoque l'ouverture des cônes et les graines se dispersent. Mais lors d'une coupe, les graines ne sont pas libérées ce qui nécessite un reboisement (Burns et Honkala 1990).

Les techniques actuelles de plantation s'intègrent dans le concept de rendement soutenu des forêts (Guo et Wang 2006). Il est donc primordial d'obtenir un bon rendement dans les plantations, idéalement un rendement supérieur à celui obtenu dans les peuplements en régénération naturelle. Il a été observé dans la littérature, pour des plantations scandinaves, un gain de croissance entre cinq et dix fois supérieur aux peuplements naturels (Agestam *et al.* 1998). Par contre, les informations sur les plantations au Québec sont encore incomplètes. Il devient donc essentiel de prédire ce rendement afin d'estimer de façon précise l'impact de ces plantations sur la possibilité forestière du Québec en forêt boréale et particulièrement au Saguenay-Lac-Saint-Jean.

Il a été mentionné, dans la littérature, que des malformations aux tiges des arbres sont fréquemment observées dans les plantations (Krause et Plourde 2008). Les tiges se voient souvent déviées de leur axe vertical. Les arbres peuvent donc présenter de fortes

inclinaiions ou encore des tiges sinueuses. Pour stabiliser leurs tiges, les conifères produisent du bois de compression afin de rétablir leur stabilité (Timell 1986). Des facteurs comme une croissance plus rapide, une plus grande formation de bois juvénile, ou encore, une plus grande pénétration du vent dans les peuplements peuvent donc induire des altérations dans la formation du bois (Krause et Plourde 2008, Bowyer *et al.* 2003, Herman *et al.* 1998). Par exemple, une plus grande formation de bois de compression, qui est essentielle à la stabilité des tiges, peut causer la diminution de la résistance mécanique (Gindl 2002). Cette baisse de résistance pourrait être la résultante, entre autres, de la diminution de la longueur des fibres. Ces malformations peuvent donc être synonymes d'altération de la qualité du produit forestier et, par conséquent, de la baisse de sa valeur marchande. Mis en évidence par les nouvelles connaissances scientifiques sur le sujet, il semble de plus en plus évident que la qualité du bois des plantations est un facteur non négligeable et doit être considérée au même titre que la rapidité des cycles de régénération (Gomes da Silva et Barrichelo 2008). Il est donc primordial de mettre en lumière l'impact des malformations des tiges sur la qualité du bois des plantations en forêt boréale. Pour se faire, deux facteurs relatifs aux plantations en forêt boréale feront l'objet de cette étude : l'analyse rétrospective de l'accroissement annuel en volume ainsi que celle de certains paramètres de la qualité du bois. Les critères de qualité sélectionnés pour cette étude sont la déformation des tiges, la formation de bois de compression ainsi que la longueur des trachéides. Ceci permettra d'établir le lien entre la croissance des plantations et les paramètres de qualité du bois (Gaudreault et Mailly 2006).

1.1 OBJECTIFS

Le premier objectif de cette étude est d'évaluer le rendement de l'épinette noire et du pin gris en plantation. Le deuxième objectif est d'évaluer certains attributs caractérisant la qualité du bois.

Les objectifs spécifiques sont :

- De mesurer l'accroissement en volume annuel et cumulé.
- De mesurer le déplacement maximal des tiges de leur axe vertical, quantifier le bois de compression et mesurer la dimension des trachéides.
- D'établir des relations entre la croissance des tiges et les paramètres de qualité mesurés.

1.2 HYPOTHÈSES

La première hypothèse est que la croissance radiale et en hauteur du pin gris sera plus rapide que l'épinette noire (Asselin *et al.* 2003). En effet, le pin gris est catégorisé comme étant une espèce pionnière et possédant une croissance juvénile rapide (Burns et Honkala 1990). La deuxième hypothèse stipule qu'une croissance en hauteur plus rapide induira une instabilité des tiges qui provoquera leur déplacement horizontal, déplacement qui sera accentué chez les pins gris (Krause et Plourde 2008). Il y aura moins de déplacement horizontal chez l'épinette noire due à sa plus faible croissance en hauteur et en diamètre. Pour rétablir leur stabilité, les pins gris formeront plus de bois de compression, et ce, proportionnellement à l'ampleur des déviations de leur axe vertical (Krause et Plourde

2008). Pour finir, la croissance rapide sera synonyme d'une plus grande proportion de bois juvénile. Ce bois ayant des propriétés dites inférieures, il sera possible de mesurer l'impact sur la longueur des trachéides (Alteyrac *et al.* 2006).

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 AIRE D'ÉTUDE ET CARACTÉRISTIQUES DES SITES

Pour ce projet, vingt sites ont été échantillonnés, soit dix plantations d'épinette noire et dix plantations de pin gris au nord de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean et situées dans les unités d'aménagement forestier 023-52, 024-51, 027-51 et 025-51 (figure 1). Les stations d'échantillonnage ont été sélectionnées grâce aux cartes écoforestières du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec et proviennent de la base nationale de données topographiques développées par le Conseil canadien de géomatique (GéoBase®). Les critères de base pour la sélection des stations étaient l'âge des plantations, soit entre 17 et 25 ans, une pente faible, un sol mésique et un bon drainage. Toutes les plantations remplissaient ces critères sauf une (PLE03), car celle-ci présentait une pente plus accentuée (tableau 1). Cette sélection a pour but de limiter les variations liées à l'environnement local.

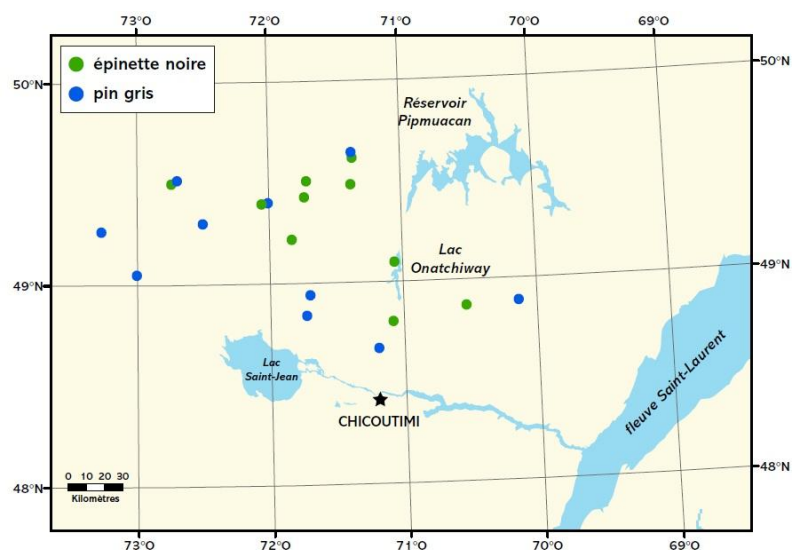


Figure 1. Emplacement des sites à l'étude

Tableau 1. Localisation et caractérisation des sites d'études. PLE = Plantation d'épinette noire, EPN = épinette noire; PLP = Plantation de pin gris, PIG = pin gris. Pente = A : pente nulle (0%-3%); B : pente faible (4%-8%); D : pente modérée (16-30%).

Sites	Espèces	Domaine biologique	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Pente	Âge de la plantation
PLE01	EPN	Sapinière	70,55678	48,88120	620	A	26
PLE03	EPN	Sapinière	71,08006	49,10290	340	D	23
PLE04	EPN	Sapinière	71,10035	48,81340	390	A	21
PLE05	EPN	Sapinière	72,69297	49,51311	230	A	24
PLE06	EPN	Sapinière	71,37666	49,62805	325	A	23
PLE07	EPN	Sapinière	71,74075	49,42821	332	B	24
PLE08	EPN	Sapinière	72,05898	49,39750	220	B	25
PLE09	EPN	Sapinière	71,83782	49,22265	271	B	24
PLE10	EPN	Sapinière	71,72166	49,50673	245	B	24
PLE11	EPN	Sapinière	71,39111	49,48680	334	B	21
PLP01	PIG	Sapinière	71,21053	48,68371	195	A	27
PLP02	PIG	Pessière	70,16975	48,89778	415	A	21
PLP03	PIG	Sapinière	71,70847	48,94940	170	A	21
PLP04	PIG	Sapinière	71,73666	48,84976	165	A	23
PLP05	PIG	Sapinière	72,68866	49,51747	228	A	24
PLP06	PIG	Sapinière	72,49969	49,30582	364	A	21
PLP07	PIG	Sapinière	71,38305	49,64305	330	A	21
PLP08	PIG	Sapinière	72,99333	49,05805	285	A	21
PLP09	PIG	Pessière	73,25666	49,26916	365	A	23
PLP10	PIG	Sapinière	72,01194	49,40305	250	A	25

2.2 ÉCHANTILLONNAGE ET TRAITEMENT DES DONNÉES

Une caractérisation de chaque plantation a été effectuée comprenant : la pédologie, un relevé de végétation, la distance entre les arbres (compétiteurs). Ensuite, des mesures à l'échelle des individus ont été effectuées incluant deux volets : la croissance et la qualité.

2.2.1 Croissance et accroissement en volume

Dans chaque plantation, la mesure de la hauteur des arbres a permis la sélection des arbres dominants, les cinq plus haut ont été retenus. Ces cinq tiges ont été abattues et coupées en rondelles selon un patron précis (figure 2). La rondelle à la base ainsi que celle de 0.5 m, 1 m, 1.3 m, et ensuite à tous les mètres, ont été utilisées pour l'analyse de tige afin de mesurer la croissance radiale.

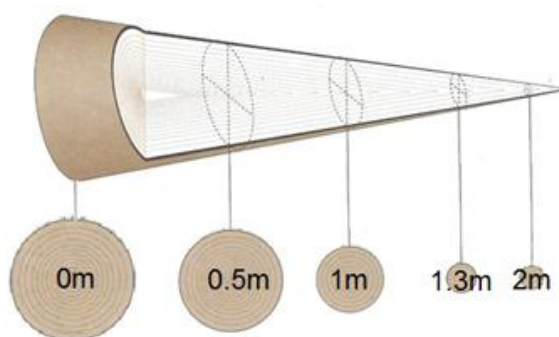


Figure 2. Schématisation du prélèvement des échantillons des arbres. À chaque mètre, à partir de la base, les rondelles sont récoltées en plus de la rondelle 0,5 m et 1,3 m. Image adaptée de Payette et Filion 2010.

À l'aide des techniques standards en dendrochronologie, les cernes de croissance ont été mesurés, et ce, grâce au logiciel WinDendro (Guay *et al.* 1992). Ensuite, la vérification de ces données de croissance, l'interdatation, est faite à l'aide de tables lumineuses ainsi que du logiciel Cofecha (Holmes 1983). Ce programme vérifie les mesures des cernes par année et pour chaque individu afin de les comparer et de les corrélérer. Cela permet de détecter les erreurs lors de la mesure des échantillons. De plus, le logiciel propose d'autres positions afin d'améliorer l'interdatation. Si cela était nécessaire, une correction était apportée. Les volumes sont ensuite calculés à l'aide du logiciel WinStem (Windendro 2010). Ce logiciel utilise les données obtenues des mesures de croissance radiale des rondelles prélevées aux différentes hauteurs de l'arbre. Ceci lui permettra de calculer la croissance en hauteur et en volume en fonction du temps (Tremblay 2009). Subséquemment, l'accroissement annuel radial est obtenu par le logiciel, en utilisant la méthode de la moyenne quadratique de Siostrzonek (1958), selon la formule suivante :

$$\text{Rayon moyen} = \sqrt{\frac{\sum R^2}{n}} \quad [1]$$

où R= mesure d'un rayon (mm)

n= nombre de rayons de la rondelle

Par la suite, le rayon moyen est multiplié par deux afin d'obtenir le diamètre. Puis, l'accroissement en hauteur est calculé avec la méthode de Carmean (1972), et les volumes, en utilisant la formule suivante (Régent Instruments Inc., 2003) :

$$Volume\ d'un\ c\^one\ tronqu\^e = \frac{\pi \times H \times (R_a^2 + R_a \times R_b + R_b^2)}{3} \quad [2]$$

$$Volume\ d'un\ arbre = \sum \left(\frac{Volume\ des\ c\^ones\ tronqu\^es}{1000} \right) \quad [3]$$

o\^u R_a = rayon de la plus grande rondelle (mm)

R_b = rayon de la plus petite rondelle (mm)

H = hauteur du tronc de c\^one (m)

2.2.2 Paramètres de la qualité du bois

2.2.2.1 Écart vertical

Les écarts maximaux des tiges sont mesurés directement sur tous les arbres des sites grâce à la prise de photos. Une planche de référence est placée derrière l'arbre, à l'aide d'un niveau, de façon perpendiculaire au sol, aux quatre points cardinaux (figure 3). Celle-ci permet la mesure des déviations (D) afin de chiffrer le déplacement maximum aussi appelé écart vertical. La planche de référence utilisée ayant deux mètres de hauteur, les écarts mesurés sont les écarts observés entre zéro et deux mètres. Les écarts maximaux seront ensuite classifiés en trois catégories de 0-9,99 cm, 10-19,99 cm et 20 cm et plus (Krause et Plourde 2008).

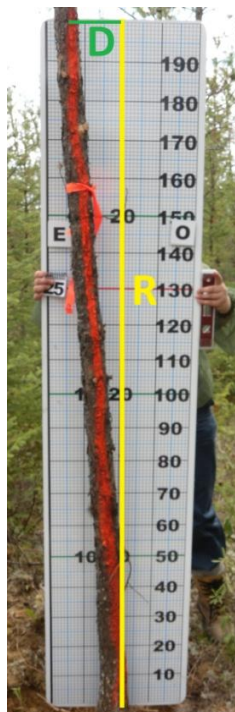


Figure 3. Mesure de l'écart vertical des tiges à l'aide d'une planche de référence mise au niveau. R= Ligne de référence, D = écart vertical maximal.

2.2.2.2 La longueur des trachéides

Pour chaque arbre récolté, les rondelles ayant servies à l'analyse de tige aux hauteurs 0,5 m 1,3 m et 2 m sont sélectionnées. Une bande de bois de 1,5 cm de large par 1,5 cm d'épaisseur, de la moelle à l'écorce, est prélevée sur celles-ci (figure 4). Le rayon qui était prélevé sur la rondelle était toujours d'orientation est. Sur chacun des échantillons ainsi prélevés, la sélection et le marquage au crayon des cernes d'intérêts sont ensuite effectués. Il a été décidé de sélectionner une année sur quatre afin de respecter le délai consacré à cette analyse dans l'échéancier du projet. Les échantillons sont ensuite immergés dans l'eau bouillante pendant environ une vingtaine de minutes pour faciliter la coupe des cernes. Avec un binoculaire, il est donc possible d'extraire les échantillons des cernes marqués, en séparant le bois initial du bois final, afin de les déposer dans des éprouvettes numérotées (figure 4). Ensuite l'étape de la macération permettra de commencer la séparation des trachéides. Les éprouvettes sont placées sur un réchaud à 90 °C après l'ajout dans chacune de 1,5 ml de peroxyde d'hydrogène et de 1,5 ml d'acide acétique glacial. Après environ 12 à 16 heures d'attente, il est possible de procéder à l'étape de la filtration (Franklin 1945). Celle-ci se fait à l'aide de filtres Whatman de 70 mm et d'un Erlenmeyer muni d'un tuyau à vacuum. Chaque échantillon est disposé sur un filtre et rincé à l'eau pendant au moins une minute trente secondes. Ensuite, les échantillons sont déposés pendant une minute trente dans un mélangeur de type Retsch MM200. Pour finir, ceux-ci sont placés dans des béchers remplis d'eau et analysés par le testeur de fibres de type L&W Fiber Tester (Karlsson 2006). Pour chaque échantillon, l'instrument mesure 5000 trachéides afin de déterminer

la largeur et la longueur moyenne des trachéïdes du bois initial et final (Karlsson 2006). Une moyenne est ensuite faite par catégorie de bois (initial et final), par espèce et par année d'âge cambial.

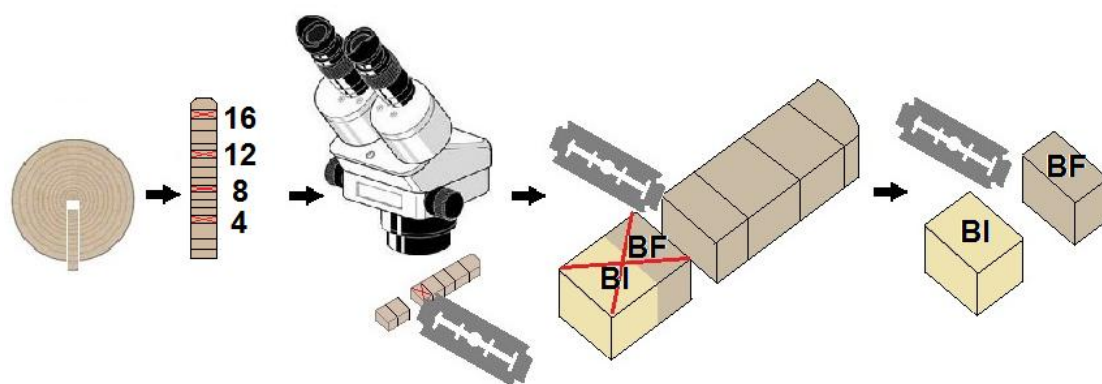


Figure 4. Les cernes d'intérêts sont prélevés (âge cambial 4, 8, 12, 16) à l'aide d'un binoculaire et d'une lame de rasoir. Le bois initial (BI) et le bois final (BF) des cernes d'intérêt ont été séparés.

2.2.2.3 Le bois de compression

Lors de l'analyse de tige, la numérisation des rondelles avec le logiciel Windendro a permis, à l'aide du contraste des couleurs, de mesurer la surface occupée par le bois de compression, dans chaque cerne de croissance. Pour obtenir un ratio, une estimation de la surface de chaque cerne de croissance était nécessaire. Celle-ci fut effectuée, en utilisant les valeurs de croissance radiale de WINDENDRO pour obtenir un rayon. Le rayon d'une année d'intérêt est calculé en additionnant la mesure de largeur de cerne de cette année et des années précédentes jusqu'à la moelle. Ce rayon est ensuite multiplié par lui-même et par π afin d'estimer la surface du cercle formé par le cerne de croissance. En calculant de la même façon la surface du cercle formée par le cerne de l'année précédente, il est possible de le soustraire à la surface précédemment calculée afin d'obtenir l'estimation de l'aire du cerne de croissance. Des moyennes sont ensuite faites pour obtenir, par espèce, le pourcentage de bois de compression par année, mais aussi par hauteur. Le pourcentage de bois de compression d'une espèce pour une année X est donc calculé de la façon suivante :

$$\% \text{ de bois de compression} = \frac{\text{Surface totale du bois de compression pour l'année } X}{\text{Surface total des cernes de croissance pour l'année } X} \times 100 \quad [4]$$

2.3 TRAITEMENT STATISTIQUE

Une analyse de variance à mesures répétées a été effectuée afin de comparer la croissance radiale, en hauteur et en volume, des arbres et des sites pour les deux espèces à l'aide du logiciel JMP 8.0 (Lehman 2005). Afin de comparer des mesures similaires, l'âge cambial est utilisé dans cette analyse et non les années du calendrier. Cette analyse se limite aux années une à dix-sept, car les arbres ont un âge minimum de dix-sept ans (figure 5). Donc, les années suivant la dix-septième ne présentaient pas l'homogénéité nécessaire à une analyse de variance à mesures répétées. Le seuil de significativité était fixé à 0.05. Pour les différents paramètres de qualité, des régressions ont été tentées afin de comparer ceux-ci entre eux. Une transformation des données des écarts verticaux a été effectuée en log, car celles-ci ne présentaient pas une distribution normale.

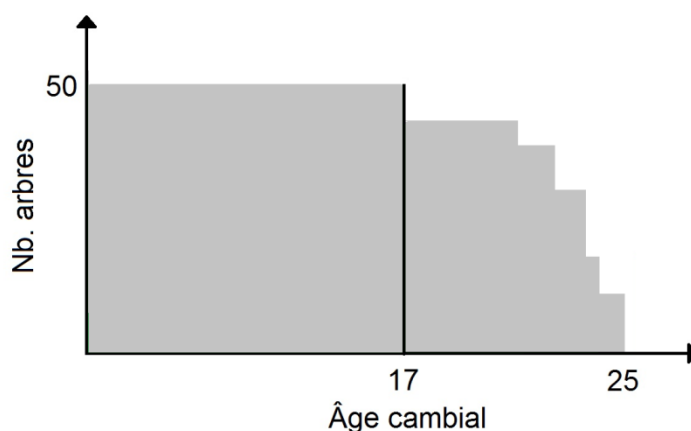


Figure 5. Schématisation des effectifs des plantations en fonction de l'âge cambial avec un nombre stable d'individus jusqu'à 17 ans.

3. RÉSULTATS

3.1 CROISSANCE

3.1.1 La croissance radiale

Les deux espèces reboisées de cette étude démontrent un patron de croissance radiale en forme de cloche (figure 6). Chez le pin gris, la croissance est exponentielle les dix premières années pour atteindre un sommet de 4 mm de croissance radiale durant sa dixième année. Entre la 6^e et la 14^e année, la croissance s'est maintenue à une moyenne supérieure à 3 mm par année. À partir de la 17^e année, une diminution de croissance est observable avec une moyenne d'un peu plus de 2 mm par année. La croissance est plus lente durant les premières années d'installation de l'épinette noire en plantations. Cette croissance atteindra son sommet autour de la 15^e année avec une moyenne avoisinant les 3 mm. Toutefois, la croissance radiale s'est maintenue au-dessus de 2 mm par année, et ce, pendant une période de 18 ans. Le pin gris a donc obtenu des valeurs supérieures pendant les douze premières années, mais inférieures à l'épinette noire pour les années 16 et 17 (tableau 2). Sur les dix-sept premières années, seules les années 13, 14 et 15 ne présentent pas de différence significative entre les deux espèces (tableau 2).

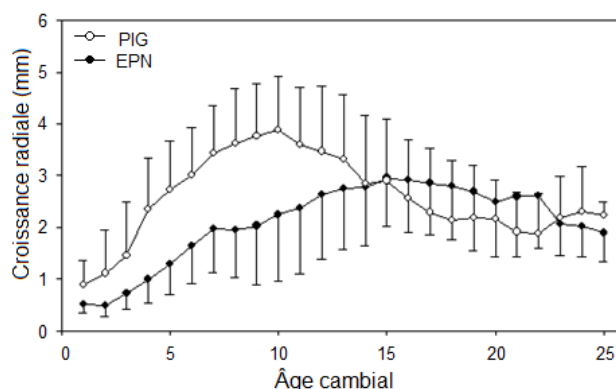


Figure 6. Croissance radiale moyenne de *Picea mariana* (EPN) en mm et *Pinus banksiana* (PIG) par année d'âge cambial. Les barres d'erreur représentent l'écart-type. Seules les années 13, 14 et 15 ne présentent pas de différences significatives.

Tableau 2. Analyse de variance à mesures répétées de la croissance radiale, en hauteur et en volume des deux espèces, par année d'âge cambial. Le symbole * indique une différence significative avec un seuil alpha de 0,05.

Croissance radiale	F. ratio	Prob.> F	Croissance en hauteur	F. ratio	Prob.> F	Croissance en volume	F. ratio	Prob.> F
<i>Espèces x Années</i>			<i>Espèces x Années</i>			<i>Espèces x Années</i>		
Année 1	74,1839	<0,0001*	Année 1	44,4629	<0,0001*	Année 1	0	1
Année 2	66,3975	<0,0001*	Année 2	30,6294	<0,0001*	Année 2	0	1
Année 3	79,4928	<0,0001*	Année 3	55,2312	<0,0001*	Année 3	0	1
Année 4	123,054	<0,0001*	Année 4	61,2435	<0,0001*	Année 4	28,4972	<0,0001*
Année 5	137,017	<0,0001*	Année 5	53,1578	<0,0001*	Année 5	41,4121	<0,0001*
Année 6	151,939	<0,0001*	Année 6	61,2636	<0,0001*	Année 6	51,0151	<0,0001*
Année 7	126,978	<0,0001*	Année 7	72,246	<0,0001*	Année 7	50,5858	<0,0001*
Année 8	110,828	<0,0001*	Année 8	70,2352	<0,0001*	Année 8	51,0173	<0,0001*
Année 9	81,0133	<0,0001*	Année 9	71,032	<0,0001*	Année 9	55,2386	<0,0001*
Année 10	48,1573	<0,0001*	Année 10	57,678	<0,0001*	Année 10	47,6122	<0,0001*
Année 11	23,2839	<0,0001*	Année 11	36,1733	<0,0001*	Année 11	43,9163	<0,0001*
Année 12	6,3715	0,0123*	Année 12	18,8458	<0,0001*	Année 12	33,1434	<0,0001*
Année 13	0,4476	0,5041	Année 13	13,2709	0,0004*	Année 13	20,9734	<0,0001*
Année 14	0,3344	0,5636	Année 14	6,8167	0,0106*	Année 14	18,0051	<0,0001*
Année 15	2,0941	0,1492	Année 15	2,8754	0,0934	Année 15	11,3849	0,0013*
Année 16	8,2468	0,0045*	Année 16	2,3717	0,127	Année 16	8,6851	0,0045*
Année 17	14,149	0,0002*	Année 17	11,1111	0,0012*	Année 17	5,5068	0,0222*

3.1.2 La croissance en hauteur

Le pin gris démontre une augmentation rapide de croissance en hauteur, année après année (figure 7A). La croissance en hauteur maximale par année est atteinte à l'âge de 9 ans avec une valeur de 50 cm par année. Ensuite, la croissance oscille autour de 40 cm par année. L'épinette noire quant à elle présente un patron de croissance annuelle en hauteur beaucoup plus lent. Le taux maximum de croissance en hauteur pour cette espèce est obtenu à la 16^e année avec 35 cm par année. Par la suite, il est possible de voir la croissance osciller autour de 30 cm par année. L'analyse de variance à mesures répétées a démontré des différences significatives entre les deux espèces pour toutes les années, à l'exception des années 15 et 16 (tableau 2). La croissance en hauteur cumulée permet de visualiser une croissance supérieure chez les pins gris qui vont atteindre huit mètres avant l'âge de vingt ans (figure 7B). L'épinette noire quant à elle atteint cinq mètres de hauteur à l'âge de vingt ans.

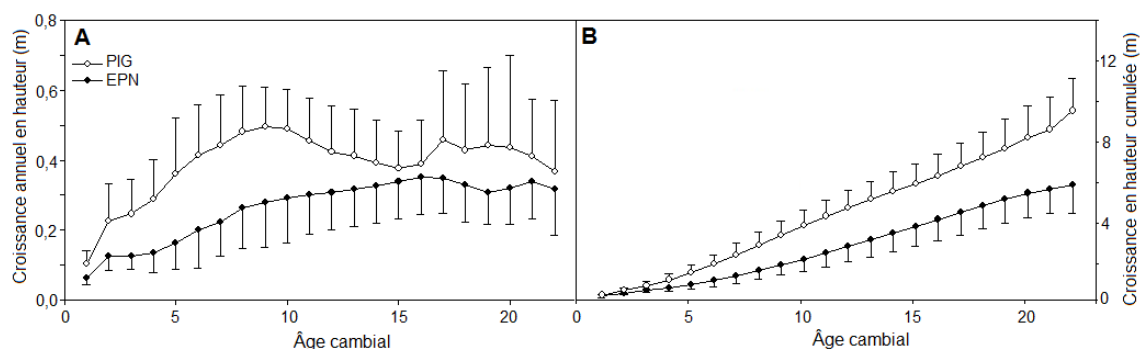


Figure 7. Croissance en hauteur annuelle (m) (A) et cumulée (m) (B) de *Picea mariana* (EPN) et *Pinus banksiana* (PIG) par année d'âge cambial. Les barres d'erreur représentent l'écart-type. Seules les années 15 et 16 ne sont pas significativement différentes.

3.1.3 La croissance en volume

La croissance en volume annuel du pin gris est supérieure à celle de l'épinette noire (figure 8A). L'augmentation du volume est constante et le maximum atteint pour cette espèce, est de près de $2,6 \text{ dm}^3$ à la 17^e année, les années suivantes ne sont pas couvertes par l'analyse statistique. De plus, dès la dixième année, les peuplements de pins gris atteignent des valeurs de croissance en volume annuel de plus de 1 dm^3 . Pour l'épinette noire, il faut attendre la 18^e année pour que leur croissance en volume soit supérieure à 1 dm^3 annuellement. Il est possible d'observer une différence significative, entre les deux espèces, à l'exception des trois premières années de croissance (tableau 2). La croissance en volume cumulée démontre une forte production en volume des peuplements de pins gris (figure 8B). À dix-sept ans, les pins gris obtiennent déjà, en moyenne, une valeur de volume cumulé supérieure à 16 dm^3 . En ce qui concerne les épinettes noires, elles obtiennent une moyenne $\sim 4 \text{ dm}^3$ en volume cumulé après 17 années de croissance.

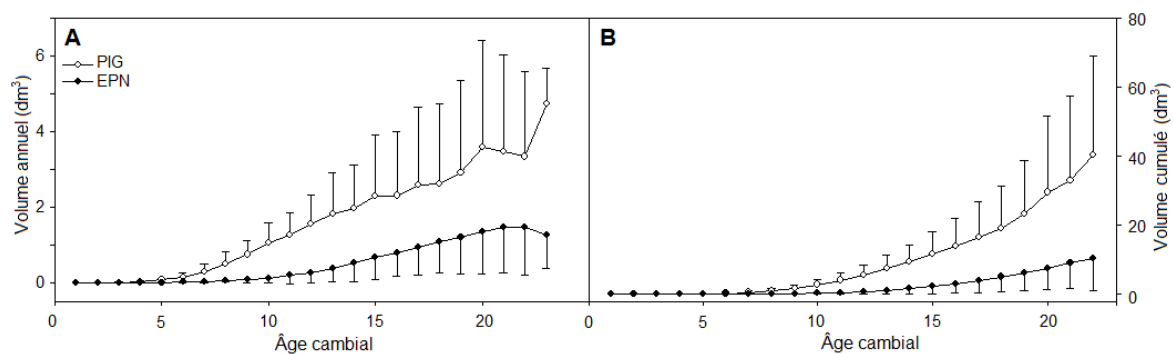


Figure 8. Croissance en volume annuel (m) (A) et cumulé (m) (B) de *Picea mariana* (EPN) et *Pinus banksiana* (PIG) par année d'âge cambial. Les barres d'erreur représentent l'écart-type. Seules les trois premières années ne sont pas significativement différentes.

3.2 QUALITÉ DU BOIS

3.2.1 Écarts verticaux des tiges

Les résultats concernant les écarts verticaux sont présentés par catégorie de déplacement horizontal maximal des deux premiers mètres de la tige (figure 9). Pour les pins gris dominants, ~75 % des arbres se situent dans la catégorie entre 0 et 9,9 cm d'écart vertical, ce qui représente un résultat inférieur à l'épinette noire qui obtient ~93 % pour cette première catégorie. Pour la catégorie entre 10 et 19,9 cm, le pin gris y est le plus représenté avec ~20 % contre 6,5 % chez l'épinette noire. Le pin gris est nettement plus représenté dans la 3^e classe, de 20 cm d'écart et plus. En effet, ~5 % des tiges de cette espèce se classe dans cette catégorie, tandis que, les épinettes noires sont présentes dans cette classe à moins de 1 %. Ce résultat démontre que les tiges de pin gris en plantation de 15 à 25 ans présentent des écarts verticaux plus importants que celles de l'épinette noire.

L'analyse des régressions pour la relation entre la hauteur des arbres et les écarts verticaux révèle que chez le pin gris, il y a une relation négative qui est significative, tandis qu'il n'y a pas de relation observée pour l'épinette noire (figure 10, tableau 3). Ce qui signifie que, chez les pins gris, plus les arbres sont hauts, moins le bois de compression est présent. Pour le dhp et les écarts verticaux, aucune relation significative n'a été obtenue pour les pins gris. Tandis qu'une relation positive et significative a été observée pour l'épinette noire. Signifiant que les épinettes ayant un grand diamètre présentent plus d'écarts verticaux (figure 10, tableau 3).

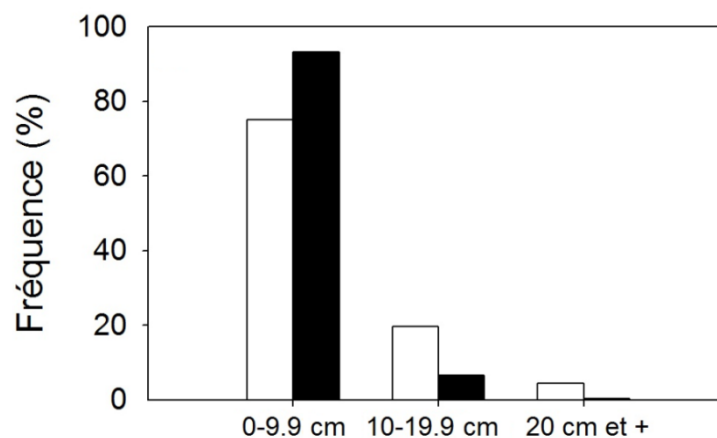


Figure 9. Pourcentage des tiges dominantes de *Picea mariana* (rubans noirs) et *Pinus banksiana* (rubans blancs) par catégorie d'écart vertical.

Tableau 3. Analyse de variance des régressions de la hauteur et du dhp avec les écarts verticaux et le bois de compression des deux espèces. PIG= pin gris, EPN= Épinette noire

Régressions PIG	R ²	Prob.> F
Hauteur*Log écart vertical	0,097126	0,0473*
Dhp*Log écart vertical	0,052571	0,1493
Hauteur*Bois de compression	0,107365	0,0230*
Régressions EPN	R ²	Prob.> F
Hauteur*Log écart vertical	0,016722	0,4327
Dhp*Log écart vertical	0,297161	0,0003*
Hauteur*Bois de compression	0,007155	0,5847

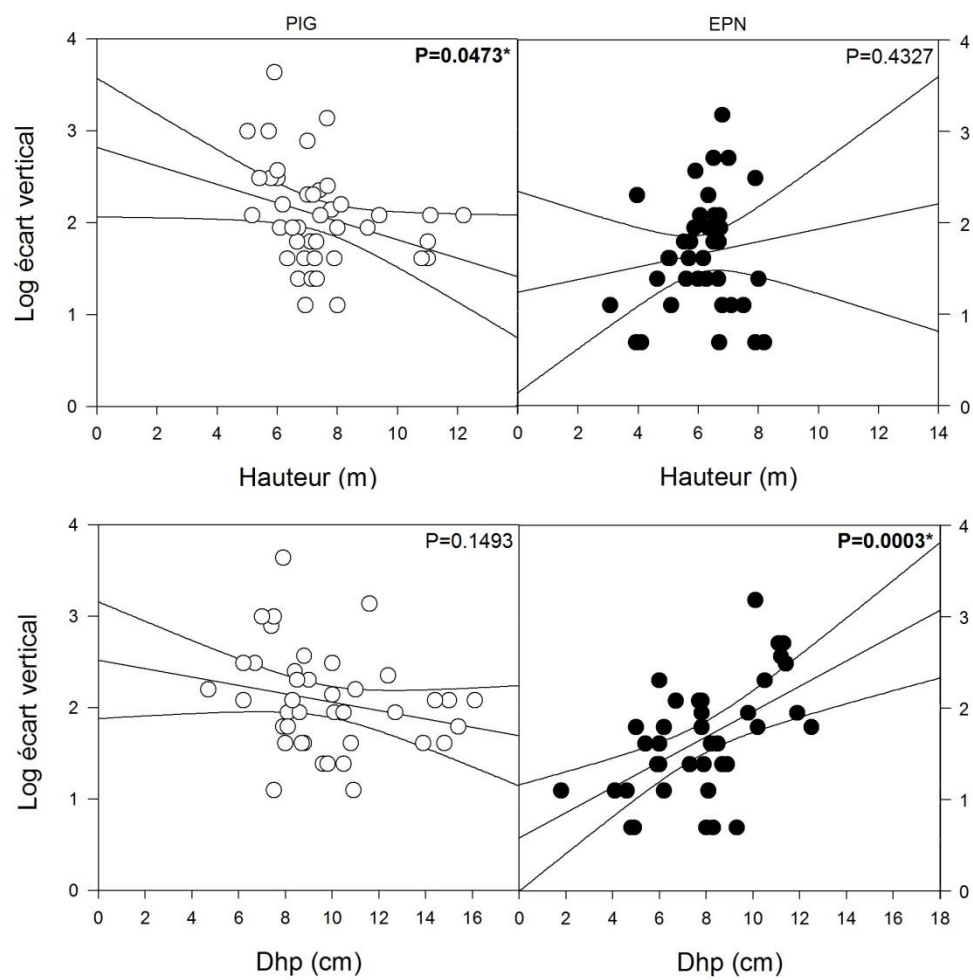


Figure 10. Régressions comparant la hauteur (m), le dhp (cm) de *Picea mariana* (EPN) et *Pinus banksiana* (PIG), avec le log des écarts verticaux

3.2.3 Bois de compression

Le pourcentage de bois de compression observé sur l'ensemble des rondelles étudiées des deux espèces est faible (figure 11). Lors des premières années suivant la mise en terre, très peu de bois de compression est formé. Toutefois, les pins gris présentent un taux moyen de bois de compression plus élevé avec une augmentation graduelle à partir de la 11^e année. Le taux maximum est atteint autour de la 15^e année et présente une valeur dépassant les 5 % de la surface du cerne de croissance. Par la suite, le taux moyen oscillera autour de 3 %. Les épinettes noires présentent un taux maximum observé de 1,25 % la 15^e année. Avec une moyenne pour toutes les années oscillant autour de 0,75 % de bois de compression pour cette espèce. De façon générale, pour les deux espèces, les valeurs de bois de compression obtenues varient grandement entre les individus.

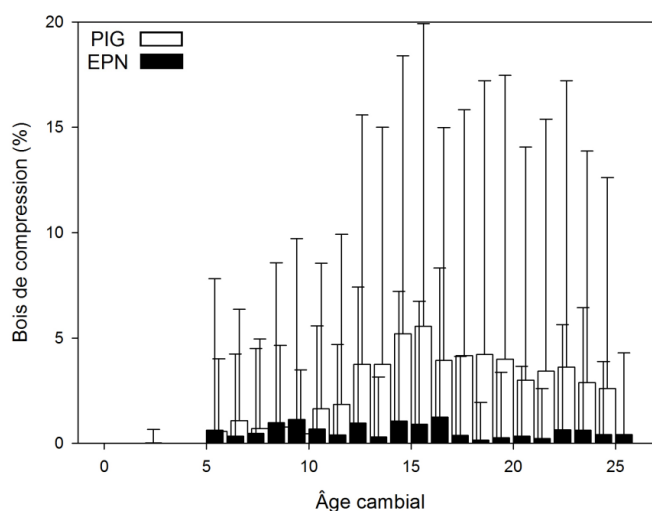


Figure 11. Taux moyen de bois de compression de *Picea mariana* (EPN) en pour cent et *Pinus banksiana* (PIG) par année d'âge cambial. Les barres d'erreur représentent l'écart-type.

La figure 12 présente le pourcentage de bois de compression observé à différentes hauteurs dans les tiges, et ce, pour les deux espèces. Les valeurs pour le pin gris sont plus élevées que celles de l'épinette noire. Chez les pins gris, à la base des tiges, environ 10 % des surfaces mesurées étaient occupées par le bois de compression, contre moins de 2 % chez l'épinette noire. Les deux espèces possèdent toutefois un patron similaire démontrant une présence accrue de bois de compression à la base ainsi que près de la cime. Une plus grande présence de bois de compression à la base influence grandement le ratio de bois de compression total dans l'arbre, car les rondelles de base représentent de grandes surfaces comparées à celles de la cime.

L'analyse des régressions permettant de mettre en relation un paramètre de croissance, la hauteur, avec le pourcentage de bois de compression a été tentée (figure 13). La hauteur est négativement corrélée avec le bois de compression du pin gris (tableau 3), aucune relation n'a été obtenue pour l'épinette noire. Chez les pins gris cela indique que plus les arbres sont petits plus la présence de bois de compression sera accrue.

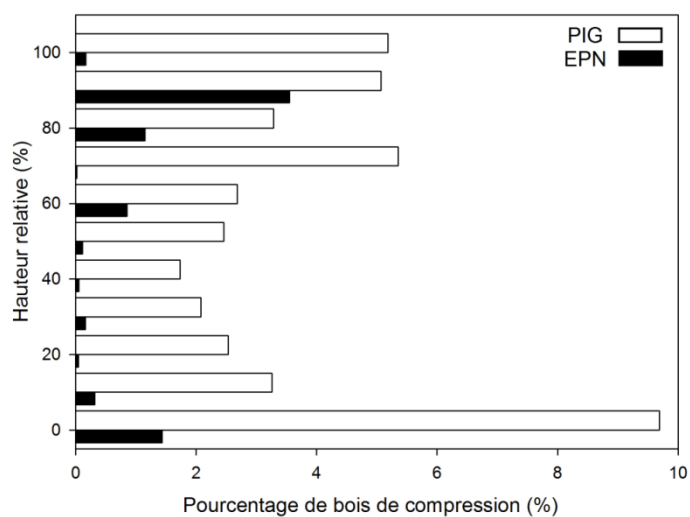


Figure 12. Taux moyen de bois de compression (%) de *Picea mariana* (EPN) et *Pinus banksiana* (PIG) par hauteur relative (%). Les barres d'erreur représentent l'écart-type.

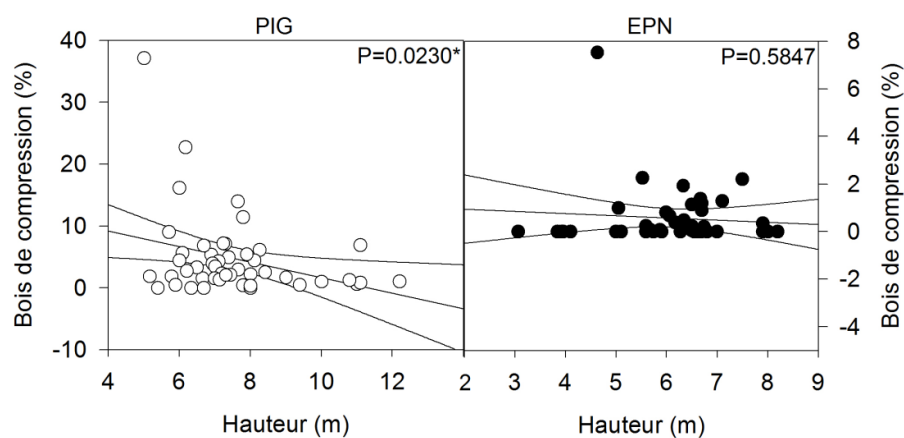


Figure 13. Régressions comparant la hauteur (m) de *Picea mariana* (EPN) et *Pinus banksiana* (PIG), avec le pourcentage de bois de compression.

3.2.2 La longueur des trachéides

La longueur des trachéides augmente avec l'âge cambial pour les deux espèces (figure 14). La longueur des trachéides est significativement supérieure chez le pin gris que chez l'épinette noire en plantation, et ce, autant pour le bois initial que final (tableau 4). La valeur maximale obtenue pour le pin gris est de 2,07 mm à l'âge de 16 ans. Le maximum obtenu pour l'épinette noire est de 1,64 mm à 16 ans. Pour les quatre années mesurées, une différence constante d'environ 8 % est observée entre le bois initial et final pour chaque espèce.

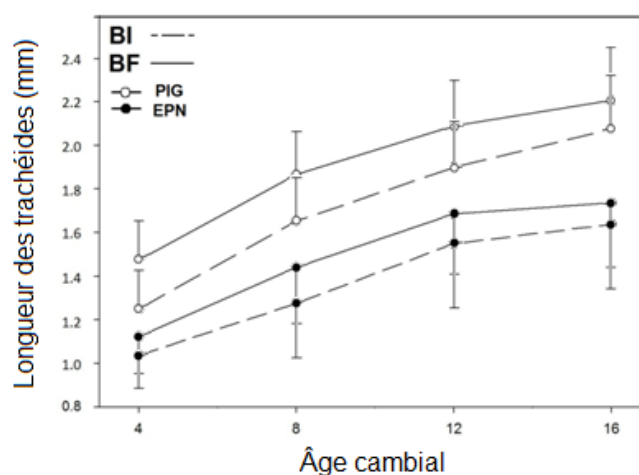


Figure 14. Longueur moyenne des trachéides du bois initial (**BI**), et final (**BF**) en mm de *Picea mariana* (EPN) et *Pinus banksiana* (PIG) par âge cambial. Les barres d'erreur représentent l'écart-type.

Tableau 4. Analyse de variance de la longueur moyenne des trachéides du bois initial et final, des deux espèces, par année d'âge cambial. BI=bois initial, BF= bois final

Longueur des trachéides BI	F. ratio	Prob.> F
Espèces*Années		
Année 4	83,4575	<0,0001*
Année 8	116,4824	<0,0001*
Année 12	50,6563	<0,0001*
Année 16	33,3383	<0,0001*
Longueur des trachéides BF	F. ratio	Prob.> F
Espèces*Années		
Année 4	159,2226	<0,0001*
Année 8	128,5543	<0,0001*
Année 12	75,9486	<0,0001*
Année 16	32,6212	<0,0001*

4. DISCUSSION

4.1 LA CROISSANCE

La majorité des organismes vivants présente un patron de croissance sigmoïdal, c'est-à-dire une phase de croissance exponentielle précédée et suivie par des phases de croissance plus lente (Philip 1994). Les conifères de la forêt boréale n'y font pas exception. Il est donc normal d'observer dans la présente étude des patrons de croissance pour les deux espèces présentant une croissance lente au début, suivie d'une accélération de croissance (figure 6). Il n'est toutefois pas possible d'observer un ralentissement de croissance avec l'âge, car les plantations étudiées sont encore trop jeunes. Comme le stipulait notre hypothèse de départ les croissances radiales, en hauteur et en volume des pins gris sont supérieures à celle des épinettes noires. Conformément à la littérature, les pins gris se comportent en espèce pionnière, en croissant rapidement afin d'occuper un maximum de territoire (Asselin *et al.* 2003). Semblables à la régénération naturelle suivant un feu de forêt, les parties aériennes des plantations de pins gris croissent très rapidement en hauteur et en diamètre dès les premières années (Asselin *et al.* 2003). Cette stratégie leur donne un avantage au niveau de la disponibilité de la lumière et se reflète dans leur croissance. Dans ce domaine, en régénération naturelle, l'épinette noire possède une stratégie différente. Cette espèce est considérée comme étant tolérante à l'ombre (Krause et Plourde 2009). Elle privilégie, dans les peuplements juvéniles en régénération naturelle, le développement racinaire à la croissance aérienne, phénomène qui est accentué quand

l'épinette est dominée par des espèces à croissance rapide, comme le pin gris, ou certains feuillus (Gagnon *et al.* 2001). Les jeunes épinettes peuvent ainsi avoir une croissance retardée dans les stades précoces de leur développement et pousser vigoureusement une fois libérées (Paquin et Doucet 1992). En plantations, les résultats obtenus démontrent que la croissance en diamètre et en hauteur des épinettes augmente graduellement dès les premières années. Cette différence est en grande partie due à la faible densité des peuplements qui maximalise la disponibilité de la lumière pour les arbres (Viereck et Johnstons 1990). De plus, la compétition pour la lumière est minimisée dans les plantations monospécifiques appliquées à grande échelle, dans la forêt boréale du Québec.

Pour la croissance en hauteur annuelle, des valeurs autour de quarante centimètres par année chez le pin gris et trente-cinq chez l'épinette noire ont été mesurées à l'âge cambial de huit et seize ans respectivement. Très peu d'études présentent des taux de croissance en hauteur annuelle. Cependant, il est possible de comparer avec les données de Prégent *et al.* 2010, qui obtiennent avec l'épinette blanche entre 28 et 40 cm produits annuellement à l'âge de 17 ans. De plus, une étude de Krause *et al.* en 2009 affiche des taux sensiblement identiques avec 35 cm de croissance en hauteur pour des épinettes noires de 10 ans. Quelques études au Saguenay-Lac-Saint-Jean ont évalué la croissance en hauteur annuelle chez l'épinette noire régénérée naturellement à moins de 25 cm durant les 25 premières années suivant la germination (Bouchard 2003, Tremblay *et al.* 2011). La faible densité des plantations semble favoriser chez l'épinette noire une forte croissance en hauteur. Pour la croissance en volume, les pins gris produisent un volume sur pied moyen

deux fois supérieur à l'épinette noire. Cette croissance en volume est le résultat de la croissance annuelle, en diamètre et en hauteur, ce qui explique les valeurs plus élevées chez les pins gris durant les vingt premières années. Zhang *et al.* en 2006 et Krause *et al.* en 2012 ont déjà présenté des résultats de croissance en volume supérieurs pour le pin gris (tableau 5, figure 15). Pour l'épinette noire, les résultats obtenus dans la présente étude cadrent bien avec différentes études comme Prigent et Végiard (2000), Krause *et al.* (2009), Homagain *et al.* (2011) et celle de Krause *et al.* (2012) (tableau 5, figure 15). La compilation des études qui évaluent le volume des espèces en plantation dans l'est du Canada révèle une grande variation attribuable principalement à la différence d'âge des arbres (tableau 5, figure 15). Pour des plantations du même âge et d'une même espèce, les variations de croissance qui persistent pourraient être attribuées à la génétique des plants, le type de sol et le type de semis, mais plus encore à la densité des plantations, le scarifiage utilisé et la localisation des sites (Tong et Zhang 2005, Burgess *et al.* 2010, Rossi *et al.* 2011). En effet, les sites les plus au sud sont majoritairement plus productifs, car ils présentent des conditions climatiques favorables avec une période de végétation plus longue et possèdent des températures minimales et maximales diurnes et nocturnes plus élevées (Rossi *et al.* 2011). En outre, une constante peut être observée lors de la comparaison des différentes études. À des âges comparables, les peuplements de pins gris produisent plus de volume par hectare que les épinettes noires (figure 15). Une relation positive est aussi observable entre l'accroissement en volume des épinettes noires et l'âge des plantations, et ce, malgré l'éloignement géographique des sites à l'étude. Le manque de données chez le pin gris ne permet pas d'en faire ressortir le même constat.

Tableau 5. Résultats adaptés de différentes études mesurant la croissance en volume (m^3/ha), pour différentes espèces, en plantations. La présente étude est appelée Bouchard 2013 et est affichée en italique. Des moyennes et des conversions d'unités ont été faites.

PIG = pin gris; EPN = épinette noire, PIR = pin rouge, EPB = épinette blanche.

Auteurs	Essences	Âge	Sites échantillonnés	Volume	Tiges/ha
<i>Bouchard 2013</i>	<i>PIG</i>	<i>25 ans</i>	<i>Qc. Can., Nord Lac-Saint-Jean</i>	<i>35.91 m^3/ha</i>	2050
<i>Bouchard 2013</i>	<i>EPN</i>	<i>25 ans</i>	<i>Qc. Can., Nord Lac-Saint-Jean</i>	<i>18.36 m^3/ha</i>	2232
Burgess 2010	PIG	9 ans	N.B. Can., N du 45e	7.76 m^3/ha	5500
Burgess 2010	EPN	9 ans	N.B. Can., N du 45e	0.37 m^3/ha	5500
Homeagain	PIR	33 ans	Ont. Can., Thunder bay	44.5 m^3/ha	2784
Homeagain	EPB	33 ans	Ont. Can., Thunder bay	23.7 m^3/ha	2943
Homeagain	EPN	33 ans	Ont. Can., Thunder bay	22.1 m^3/ha	2990
Krause 2009	EPN	16 ans	Qc. Can., 48e	1.6 m^3/ha	3000
Krause 2012	PIG	22 ans	Qc. Can., 50e et 48e	54.30 m^3/ha	2058
Krause 2012	EPN	22 ans	Qc. Can., 50e et 48e	19.75 m^3/ha	2230
Prégent 1996	EPN	22 ans	Qc. Can.	22.1 m^3/ha	2403
Prégent 2000	EPN	18 ans	Qc. Can., Nord Lac-Saint-Jean	3.72 m^3/ha	1850
Prégent 2010	EPB	25 ans	Qc. Can.	25.8 m^3/ha	2000
Zhang 2006	PIG	20 ans	N.B. Can	82.3 m^3/ha	1825

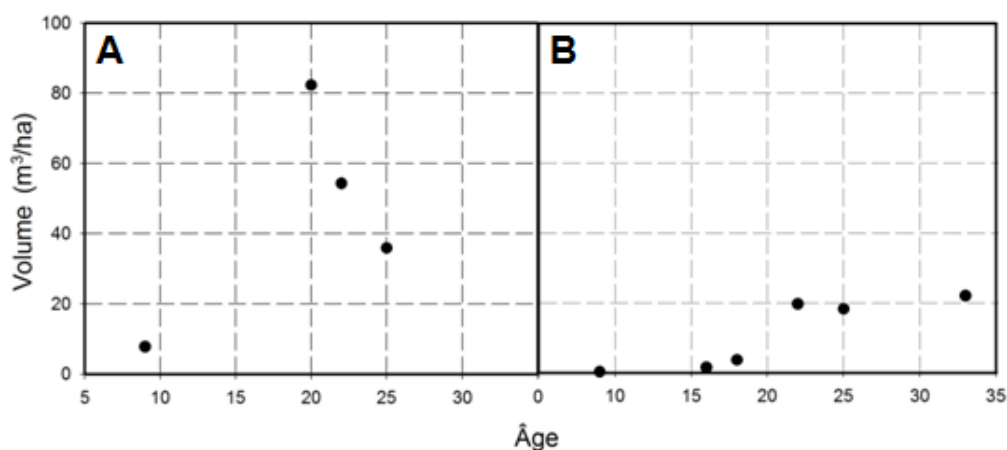


Figure 15. Volumes par hectare (m^3/ha) de différentes études (tableau 5) portant sur les plantations dans l'est du Canada. **A** = pin gris; et **B** = l'épinette noire.

De plus, l'utilisation de différentes techniques de calcul du volume peut donner des résultats plus ou moins précis. Dans la présente étude, l'estimation des volumes est

basée sur des analyses de tiges. Le plus souvent, les tables de rendements sont produites avec la hauteur et le dhp, et donc, basées sur des estimations beaucoup moins précises (Forslund et Paterson 1994, Krause *et al.* 2012). Toutefois, si la production en volume (m^3/ha) des pins gris, dont fait l'objet ce document, sont comparées aux tables de rendements (Pothier et Savard 1998), leur production est supérieure à celle estimée dans les peuplements en régénération naturelle ($27 \text{ m}^3/\text{ha}$). Pour l'épinette noire, l'estimation des volumes pour des peuplements en régénération naturelle est de $20 \text{ m}^3/\text{ha}$ ce qui est légèrement supérieur aux résultats obtenus.

Finalement, le choix stratégique du pin gris semble donc procurer à cette espèce un avantage en ce qui a trait à la production de bois comparativement à l'épinette noire. Cette espèce est d'ailleurs reconnue comme ayant la croissance la plus rapide de tous les conifères en Amérique du Nord (Rudolph et Laidly 1990). Autre avantage pour le pin gris en plantation, celui-ci semble pouvoir offrir le même rendement de productivité indépendamment du domaine écologique (Krause *et al.* 2012). Au contraire, l'épinette noire semble plus productive dans la sapinière que dans la pessière, donc plus productive au sud qu'au nord (Krause *et al.* 2012). Ce second avantage semble identifier le pin gris comme étant l'espèce à privilégier pour le reboisement, si l'on considère les objectifs de production de bois uniquement. Par contre, au Saguenay-Lac-Saint-Jean plus de 75 % des plantations sont des plantations d'épinettes noires, versus 18 % pour les plantations de pins gris (Murray 2014). Tout en tentant de conserver le paysage forestier actuel, une utilisation

accrue du pin gris pour le reboisement aiderait certainement l'industrie à obtenir un meilleur rendement de ses plantations.

4.2 LA QUALITÉ

4.2.1 Les écarts verticaux et le bois de compression

Les écarts verticaux des tiges, ou sinuosités, sont souvent observés en plantation, mais rarement dans les peuplements en régénération naturelle (Janas et Brand 1988, Krause et Plourde 2008). La charge de la neige et la force du vent ont été identifiées comme étant des causes potentielles (Del Rio *et al.* 2004). Des problèmes de développement du système racinaire, tel que l'absence de racine pivot peut induire ces écarts verticaux (Rune 2003, Plourde 2007, Krause et Plourde 2008). La droiture des tiges est pourtant un facteur essentiel à la rentabilité des plantations. Lors du sciage les tiges déformées entraînent des pertes non négligeables pour les compagnies forestières (Timell 1986, Plourde 2007).

De plus, des études établissent un lien entre la croissance en hauteur rapide et les déformations (Downes et Turvey 1990, Peltola et Kellomäki 1993, Spicer *et al.* 2000, Krause et Plourde 2008). Les espèces à croissance lente sont quant à elles moins affectées (Gartner et Johnson 2006). Conformément à notre hypothèse, la forte croissance radiale et en hauteur des pins gris de la présente étude a engendré plus de déformations. En effet, 20 % des tiges de pins gris ont des écarts verticaux de plus de 5 cm, contre 6,5 % pour les épinettes noires (figure 9). Cependant, les tiges des deux espèces classées dans la catégorie d'écart de plus de 20 cm sont peu nombreuses. Une étude de Krause et Plourde en 2008, étudiant de la même façon les écarts verticaux de ces deux espèces, présentait des écarts plus élevés pour des plantations âgées entre 13 et 17 ans. Une étude dans des plantations suédoises de pin sylvestre en 2004, a démontré une diminution des écarts verticaux avec

l'augmentation de l'âge des plantations (Warensjö et Rune 2004). Les deux espèces de la présente étude semblent aussi se redresser avec l'âge.

Chez le pin gris, des résultats surprenants ont été obtenus : plus les arbres sont hauts, moins ils présentent d'écarts verticaux. Il peut être avancé que la stabilité des tiges dominantes des pins gris est obtenue grâce à un plus haut taux de production cellulaire étant donné que la croissance radiale est positivement corrélée à la croissance en hauteur (Krause *et al.* 2013). De plus, une étude récente (Bouchard 2014), a démontré que les pins gris forment des racines en profondeur sous la souche, malgré l'avortement de la racine pivotante observé fréquemment dans des plus jeunes plantations (Sheedy 1997, Rune 2003, Krause et Ploude 2008). Il est possible d'émettre l'hypothèse que les pins gris avec une forte croissance en hauteur se stabilisent davantage, car ils forment des racines plongeantes. Les pins gris plus petits ont probablement moins d'énergie disponible à investir dans leur stabilisation (Bouchard 2014). Le faible taux d'écart vertical observé chez l'épinette noire peut être associé à un meilleur ratio entre la biomasse racinaire versus la biomasse aérienne comparativement au pin gris (Krause *et al.* 2013).

Un élément supplémentaire à considérer est la longueur de la cime vivante qui couvre entièrement les tiges de pins gris des plantations à l'étude. Le poids des branches, spécialement sous couvert de neige, peut infliger des pressions plus grandes sur la tige et engendrer des écarts verticaux (Plourde 2007). La croissance rapide des pins gris et le poids de la cime vivante devraient donc induire des écarts verticaux, les tiges pour se stabiliser, formeront du bois de compression.

Une étude de Krause et Plourde en 2008 étudiant des jeunes plantations âgées entre 8 et 12 ans, présentait des taux de bois de compression sur le volume de bois produit entre 17 et 25 % pour le pin gris et 15 à 20 % pour l'épinette noire. Comparés à ces résultats, les taux de bois de compression, dans la présente étude, sont plus faibles avec moins de 3 % et moins de 1 % pour le pin gris et l'épinette noire respectivement.

Les résultats pour le taux de bois de compression par hauteur des deux espèces suggèrent que celui-ci se situe le plus à la base et à la cime de l'arbre. La présence de bois de compression près de la cime pourrait être expliquée par la force qu'exerce le poids de la cime sur la tige qui à cette hauteur possède encore un petit diamètre et peu de parois lignifiées. La présence de bois de compression près de la base est le résultat du poids et donc de la force exercée par la tige entière. L'absorption de ces forces se fait à l'interface tige racine, à l'aide de la production de bois de compression et grâce au système racinaire qui transfère les forces aux encrages racinaires. Dans la littérature, certains auteurs suggèrent malgré le fait que le bois de compression est formé pour pallier aux déformations des tiges, celui-ci est souvent présent dans le bois juvénile à cause du haut taux de croissance dans cette région de la tige (Pillow et Luxford 1937, Burdon 1975, Harris 1977). Pour les deux espèces, très peu de bois de compression est observé dans les quatre premières années suivant la mise en terre. Cet élément peut être en lien avec le fait que les semis ont des taux de croissance encore faibles dans les premières années suivant la germination.

La présente étude démontre que chez les pins gris, du moins, plus les arbres sont hauts, moins il y a d'écart vertical et moins il y a de bois de compression. La portion de bois juvénile dans la tige diminuant d'année en année. Il est possible d'avancer que la formation du bois de compression dans la tige, est de moins en moins nécessaire quand les arbres croissent, car le ratio bois juvénile est de moins en moins important (Gartner 2005, Koubba *et al.* 2005). Combiné à une croissance radiale stabilisée, un meilleur ancrage racinaire, les plantations produisent avec le temps des tiges de plus en plus droites, le lien entre le bois de compression et les écarts verticaux des tiges apparaît donc évident. Pourtant, dans la littérature, ce lien reste toujours incertain. Certaines études rapportent un lien entre ces deux paramètres (Ba *et al.* 2010, Michalska et Klisz 2011), d'autres non (Spicer *et al.* 2000, Berthier et Stokes 2006, Lachenbruch *et al.* 2010). Le bois de compression est reconnu pour avoir des propriétés inférieures (Bowyer *et al.* 2007). Il contient moins de cellulose (environ 10%) et plus de lignine et d'hémicellulose (Côté *et al.* 1966). De plus, les trachéides du bois de compression peuvent être de longueurs inférieures de près de 30 % comparés au bois normal (Spurr et Hyvärinen 1954; Dinwoodie 1961). Ces altérations engendrent une pulpe beaucoup moins résistante pour la pâte et papier (kraft) (Timell 1986). La relation entre le bois de compression et les écarts verticaux mérite d'être éclaircie, cependant l'importance de ces deux paramètres dans la formation de bois de qualité est primordiale.

4.2.3 La longueur des trachéides

Pour la longueur des trachéides, les pins gris affichent des valeurs de longueur moyenne de trachéides de 0,5 mm supérieures aux épinettes noires. Cependant, la longueur maximum de 2,2 mm chez les pins gris et 1,73 mm pour les épinettes noires représente une infériorité de 50 et 60 % face à la longueur théorique. Celle-ci est de 3,5 mm pour les deux espèces (Karlsson 2006). Pour les deux espèces, conformément à la littérature, la longueur des trachéides augmente avec l'âge (Bao *et al.* 2001).

Il est mentionné dans la littérature qu'en plantation ainsi qu'en peuplement naturel, il y a une augmentation de la longueur des trachéides lors du passage du bois juvénile au bois mature (Bao *et al.* 2001). Il est fréquemment mentionné que les propriétés caractérisant la qualité du bois augmentent de cerne en cerne à l'intérieur du bois juvénile jusqu'à une stabilité qui correspond au début du bois mature (Gartner 2005, Koubba *et al.* 2005). Dans les plantations étudiées, l'augmentation de la longueur des trachéides, des deux espèces, semble ralentir après la 12^e année. La croissance radiale aussi est ralentie après une dizaine d'années. Les plantations de pins gris et d'épinettes noires semblent donc commencer à présenter des attributs d'arbres matures très tôt dans leurs développements. Une transition précoce du bois juvénile au bois mature a déjà été observée chez le pin gris qui présentait une stabilisation de la croissance annuelle, et la production de cônes dès l'âge de huit ans (Plourde *et al.* 2014).

Chez les conifères, la morphologie des trachéides est importante, car elle joue un rôle dans la résistance mécanique, affectant les propriétés physiques du bois (Zobel et van Buijtenen 1989). Pour le bois d'œuvre et les produits de pâtes et papier, les caractéristiques recherchées sont la densité et la morphologie des trachéides de même que la proportion de bois juvénile (Manuel de foresterie 2009). De toute évidence, il est primordial pour cette industrie d'attendre que le ratio bois juvénile et bois mature, soit le plus avantageux possible, avant la récolte, pour avoir un bois de qualité. Par exemple, les études sur le sapin de douglas estiment qu'une rotation aux 30 ans produit 44 % de bois mature dans les tiges, mais ce pourcentage augmente à 78 % à 55 ans (Gartner 2005). Les résultats de la présente étude affichent une croissance en volume faible, surtout chez l'épinette noire, jusqu'à l'âge de 10 ans. Le volume de bois produit augmente ensuite de façon exponentielle dans les années suivantes. Si l'on considère que les plantations étudiées présentent des attributs d'arbres matures après douze ans, il semble possible d'avancer que le ratio de bois mature dans les tiges augmentera rapidement après ce délai.

Les résultats obtenus semblent appuyer l'hypothèse émise selon laquelle les plantations produisent du bois possédant des trachéides plus courtes. Les résultats obtenus pour les deux espèces sont très éloignés de la valeur théorique de 3,5 mm, même à seize ans (Karlsson 2006). Par contre, l'hypothèse basée sur la littérature (Taylor et Burton 1982, Herman *et al.* 1998, Koubba *et al.* 2005) qui stipulait que le pin gris, étant une espèce à croissance rapide, formerait plus de bois de compression et par conséquent aurait des trachéides plus courtes semble réfutée. Cependant, des corrélations inverses, c'est-à-dire des

corrélations positives entre la croissance et la longueur des trachéides, ont déjà été observées chez *Pinus patula* (Ringo et Klem 1989). Cette contradiction peut-être expliquée en partie par le fait que la baisse de la résistance mécanique, liée à la croissance rapide, n'est pas nécessairement engendrée par une baisse de la longueur des trachéides. L'épaisseur des parois cellulaires joue aussi un rôle majeur et influence considérablement la résistance mécanique (Bowyer *et al.* 2003). Ce lien entre la rapidité de la croissance et la faible épaisseur des parois cellulaire a aussi été mis en évidence chez *Pinus brutia* (Adamopoulos *et al.* 2012). De plus, chez l'épinette noire, il a été observé dans des peuplements naturels que les sites plus productifs, qui sont situés les plus au sud, présentent une plus grande résistance mécanique (Rossi *et al.* 2014). Celle-ci serait, entre autres, reliée à une grande production de cellules de bois final (Rossi *et al.* 2014). Dans les plantations, il est possible que la forte croissance en hauteur et en diamètre, jumelée à une saison de croissance courte, engendre une période d'élongation trop restreinte pour permettre aux fibres d'atteindre des longueurs comparables aux valeurs théoriques des peuplements naturels.

5. CONCLUSION

La foresterie et le reboisement sont des enjeux socio-économiques et écologiques majeurs au Québec. Beaucoup d'efforts sont déployés en forêt boréale, notamment au Saguenay-Lac-Saint-Jean, afin de parfaire les connaissances scientifiques particulièrement en ce qui concerne les essences d'intérêt, comme l'épinette noire et le pin gris. Dans la présente étude, le pin gris obtient une croissance en volume et en hauteur supérieure et plus rapide que l'épinette noire. Cependant, les épinettes noires présentent des tiges ayant moins de déviations et moins de bois de compression. Une relation positive a aussi été mise en évidence entre la déviation des pins gris et la présence élevée du bois de compression. La longueur des trachéides augmente avec le temps et elles sont étonnamment plus longues chez le pin gris. Par conséquent, le pin gris semble être un choix judicieux pour le reboisement, car cette espèce, malgré les déviations des tiges et une occurrence de bois de compression plus élevée, affiche une croissance rapide et des trachéides plus longues. Par contre, il aurait été intéressant d'ajouter à cette étude d'autres mesures qui caractérisent la qualité du bois, comme la résistance mécanique, l'angle des microfibrilles ainsi que la présence et la grosseur des nœuds. L'ajout de ces paramètres aurait permis d'obtenir un portrait plus complet de la qualité des arbres étudiés afin d'y opposer leurs croissances respectives.

6. RÉFÉRENCES

- Adamopoulos, S., Wimmer, R. et Milios, E., 2012. Tracheid length-growth relationship of young *Pinus brutia* grown on reforestation sites. *IAWA* 33 : 39-49.
- Agestam, E., Ekö, P.M. et Johansson, U., 1998. Timber quality and volume growth in naturally regenerated and planted Scots pine stands in S.W. Sweden. *Studia Forestalia Suecica* 204 : 1-17.
- Alteyrac, J., Cloutier, A. et Zhang, S.Y., 2006. Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) at different stand densities and sampling heights. *Wood Science and Technology* 40 : 124-138.
- Asselin, H., Payette, S., Fortin, M.J. et Vallée, S., 2003. The northern limit of *Pinus banksiana* Lamb. in Canada: explaining the difference between the eastern and western distributions. *Journal of Biogeography* 30(11) : 1709-1718.
- Ba, M., Salin, F., Fourcaud, T. et Stokes, A., 2010. Reorientation strategies in leaning stems of young maritime pine (*Pinus pinaster*) and loblolly pine (*Pinus taeda*). *IAWA Journal* 31(4) : 465-480.
- Bao, F.C., Jiang, Z.H., Jiang, X.M., Lu, X.X., Luo, X.Q. et Zhang, S.Y., 2001. Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China. *Wood Science and Technology* 35(4) : 363-375.
- Berthier, S. et Stokes, A., 2006. Righting response of artificially inclined maritime pine (*Pinus pinaster* Ait) saplings to wind loading. *Tree Physiology* 26(1) : 73-79.
- Bouchard, M.H., 2003. Croissance et dynamique de l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) dans deux types écologiques de la forêt boréale québécoise, région écologique 6^e Coteaux de la rivière Nestaocano. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.
- Bouchard, M., 2014. Le système racinaire du pin gris en plantation âgé de 18 à 25 ans. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.
- Bouchard, S., 2011. Histoire de la foresterie. Les chemins de travers, Société Radio-Canada. http://www.radio-canada.ca/emissions/les_chemins_de_travers/2010-2011/chronique.asp?idChronique=132010 (émission radiodiffusée le 23 janvier 2011).
- Bowyer, J.L., Shmulsky, R. et Haygreen, J.G., 2003. Forest products and wood science: An introduction. 4e édition, Iowa State Press, Iowa, USA. 554 pages.

Bowyer J. L., Shmulsky, R. et Haygreen, J.G., 2007. Forest Products and Wood Science: An introduction. 5e edition, Blackwell Publishing, Oxford, UK. 558 pages.

Burdon, R.D., 1975. Compression wood in *Pinus radiata* clones on four different sites. New Zealand Journal of Forestry Science 5(2) : 152-164.

BFC (Bureau du forestier en Chef), 2013. Distinction entre la forêt boréale et la forêt publique sous aménagement. Fiche thématique. [En ligne]. <http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2012/12/20070914-fiche-foret-boreale.pdf> (pages consultées le 24 mars 2014)

Burgess, D., Adams, G., Needham, T., Robinson, C. et Gagnon, R., 2010. Early development of planted spruce and pine after scarification, fertilization and herbicide treatments in New Brunswick. The Forestry Chronicle 86(4) : 444-454.

Burns, R.M. et Honkala, B.H., 1990. Silvics of North America, Volume 1, Conifers. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 654, Washington, D.C. 675 pages.

Carmean, W.H., 1972. Site index curves for upland oaks in the Central States. Forest Science 18(2) : 109-120.

Côté, W., Timell, T. et Zabel, R., 1966. Studies of compression wood. Part I. Distribution of lignin in compression wood of red spruce, *Picea rubens* Sarg Holz als Roh-Werkstoff. 24 : 432-438.

Dancause, A., 2008. Le reboisement au Québec. Les publications du Québec. 177 pages.

Del Rio, M., Bravo, F., Pando, V., Sanz, G. et De Grado, R.S., 2004. Influence of individual tree and stand attributes in stem straightness in *Pinus pinaster* Ait. stands. Annals of Forest Science 61(2) : 141-148.

Dinwoodie, J.M., 1961. Tracheid and fibre length in timber: a review of literature. Forestry 34(2) : 125-144.

Downes, G.M. et Turvey, N.D., 1990. Lignification of wood from deformed *Pinus radiata*. Forest Ecology and Management 37 : 123-130.

Forslund, R.R. et Paterson, J.M., 1994. Nondestructive volume estimate of 11-year-old jack pine and black spruce using the power function volume model. The Forestry Chronicle 70(6) : 762-767.

Franklin, G.L., 1945. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites and a new macerating method for wood. Nature 155: 51.

Gagnon, R., Morin, H., Lord, D., Côté, D. et Fortin, S., 2001. L'aménagement durable des forêts d'épinette noire du Canada en regard des feux. *Le naturaliste Canadien* 125(3) : 26-35.

Gartner, B., 2005. Assessing Wood Characteristics and Wood Quality in Intensively Managed Plantations. *Journal of Forestry* 103(2).

Gartner, B.L. et Johnson, G.R., 2006. Is long primary growth associated with stem sinuosity in Douglas-fir? *Canadian Journal of Forest Research* 36(9) : 2351-2356.

Gaudreault, M., Mailly, D., 2006. La croissance internodale: une méthode basée sur la dendrochronologie. [En ligne]
<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gaudreault-Melanie/porte-ouverte-dendrochronologie.pdf> (page consultées le 12 décembre 2010).

Gindl, W., 2002. Comparing mechanical properties of normal and compression wood in Norway spruce: The role of lignin in compression parallel to the grain. *Holzforschung* 56(4) : 395-401.

Girard, F., 2008. Origine, dynamique et répartition des pessières à lichens dans la zone de la forêt boréale fermée. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada. 172 pages.

Gomes da Silva, J. et Barrichelo L., 2008. Wood Quality from Plantation forests. [En ligne] (pages consultées le 1 novembre 2010).

Guay, R., Gagnon, R. et Morin, H., 1992. A new automatic and interactive tree ring measurement system based on a line scan camera. *The Forestry Chronicle* 68(1) : 138-141.

Guo, J.P. et Wang, J.R., 2006. Comparison of height growth and growth intercept models of jack pine plantations and natural stands in northern Ontario. *Canadian Journal of Forest Research* 36(9) : 2179-2188.

Harris, J.M., 1977. Shrinkage and density of radiata pine compression wood in relation to its anatomy and mode of formation. *New Zealand Journal of Forestry Science* 7(1) : 91-106.

Herman, M., Dutilleul, P. et Avella-Shaw, T., 1998. Intra-ring and inter-ring variations of tracheid length in fast-grown versus slow-grown Norway spruce (*Picea abies*). *IAWA Journal* 19(1) : 3-23.

Holmes, R.L., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43 : 69-78.

Homagain, K., Shahi, C., Carmean, W., Leitch, M. et Bowling, C., 2011. Growth and yield comparisons for red pine, white spruce and black spruce plantations in northwestern Ontario. *The Forestry Chronicle* 87(4) : 494-503.

Janas, P.S. et Brand, D.G., 1988. Comparative growth and development of planted and natural stands of jack pine. *The Forestry Chronicle* 64(4) : 320-328.

Karlsson, H., 2006. Fibre guide, fibre analysis and process applications in the pulp and paper industry. A handbook. Publié par AB Lorentzen & Wettre, Kista, Sweden. 120 pages.

Koubaa, A., Isabel, N., Zhang, S.Y., Beaulieu, J. et Bousquet, J., 2005. Transition from juvenile to mature wood in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P. *Wood Fiber Science* 37 : 445-455.

Krause, C. et Plourde, P.Y., 2008. Stem deformation in young plantations of black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) and jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) in the boreal forest of Québec, Canada. *Forest Ecology and Management* 255(7) : 2213-2224.

Krause, C., Morin, H. et Plourde, P.Y., 2009. Juvenile growth of black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) stands established during endemic and epidemic attacks by spruce budworm (*Choristoneura fumiferana* [Clemens] in the boreal forest of Québec, Canada. *The Forestry Chronicle* 85(2) : 267-276.

Krause, C., Luszczynski, B., Morin, H., Rossi, S. et Plourde, P.Y., 2012. Timing of growth reductions in black spruce stem and branches during the 1970s spruce budworm outbreak. *Canadian Journal of Forest Research* 42(7) : 1220-27.

Krause, C., Déry Bouchard, C.A., Plourde, P.Y. et Mailly, D., 2013. Compression wood and stem horizontal displacement in black spruce and Jack pine plantations in the boreal forest. *Forest Ecology and Management* 302 : 154-162.

Krech, S., McNeill, J.R. et Merchant, C., 2004. *Encyclopedia of world environmental history*. Routledge. Volume 3. 1504 pages.

Lachenbruch, B., Droppelmann, F., Balocchi, C., Peredo, M. et Perez, E., 2010. Stem form and compression wood formation in young *Pinus radiata* trees. *Canadian Journal of Forest Research* 40(1) : 26-36.

Lafond, R., 2008. *La sylviculture durable*. Montréal CCDMD. 204 pages.

Lehman, A., 2005. *JMP for Basic Univariate and Multivariate Statistics: A Step-by-step Guide*. SAS Institute (1 édition). 481 pages.

Lussier, J.M., Morin, H. et Gagnon, R., 2002. Évolution de la structure diamétrale et production ligneuse des pessières noires issues de coupe et de feu. *Canadian Journal of Forest Research* 32(3) : 526–538.

Manuel de foresterie, Seconde édition, 2009, Éditeurs : Éditions MultiMondes et Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, xxix, 1510 pages, ISBN : 9782895441380.

Michalska, A. et Klisz, M., 2011. The changes of wood structure in deformed Scots pine trees. *Annals of Warsaw University of Life Sciences. SGGW Forestry and Wood Technology* 75 : 98-102.

MRN (Ministère des ressources naturelles), 2009. Ressources et industrie forestière. Portrait statistique édition 2010. [En ligne]. https://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/stat_edition_complete/comple2010.pdf (page consultée le 24 mars 2014).

a MRN (Ministère des ressources naturelles), 2013. Emplois liés aux ressources forestières. [En ligne]. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/enligne/forets/criteres-indicateurs/5/535/535.asp> (pages consultées le 24 mars 2014).

b MRN (Ministère des ressources naturelles), 2013. Le régime forestier québécois. [En ligne]. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/comprendre/regime-forestier.pdf> (pages consultées le 24 mars 2014).

Murray A., 2014. Technicienne. Ministère des ressources naturelle. Saguenay-Lac-Saint-Jean. Communication personnelle.

Paquin, R. et Doucet, R., 1992. Productivité de pessières noires boréales régénérées par marcottage à la suite de vieilles coupes totales au Québec. *Canadian Journal of Forest Research* 22(4) : 601 -612.

Payette, S. et Filion, L., 2010. La dendroécologie : principes, méthodes et applications. Presses de l'Université Laval, Québec. 758 pages.

Peltola, H. et Kellomäki, S., 1993. Swaying of trees as caused by wind: analysis of field measurements. *Silva Fennica* 27(2) : 113-126.

Philip, M.S., 1994. Measuring trees and forests. CABI Publishing, 2e édition. Oxford. 336 pages.

Pillow, M.Y. et Luxford, R.F., 1937, Structure, occurrence, and properties of compression wood. USDA (United States Department of Agriculture). Technical Bulletin 546, 32 pages.

Plourde, A., 2007. Croissance, développement et architecture des structures aériennes et souterraines de pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) dans un peuplement naturel et une plantation. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi. 141 pages.

Plourde, A., Krause C., Lord D., Tremblay, M.J. et Barthélémy, D., 2014. Evolution of polycyclisme in jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) in the boreal forest of Canada. Département des Sciences fondamentales. Article en preparation.

Porter, L. et Hecht, A., 2010. L'économie forestière du Canada. Les Textes Géographiques Virtuels. [En ligne]. <http://www.v-g-t.de/francais/canada/module/m2/u6.htm> (pages consultées le 11 mars 2011).

Pothier, D. et Savard, F., 1998. Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec. Québec : Ministère des Ressources naturelles (MRN), 183 pages.

Prégent, G., Bertrand, V. et Charrette, L., 1996. Tables préliminaires de rendement pour les plantations d'épinette noire au Québec. Mémoire de recherche forestière n° 118. Ministère des Ressources naturelles, Québec, 88 pages.

Prégent, G. et Végiard, S., 2000. Rendement anticipé des plantations d'épinette noire dans les domaines écologiques de la pessière noire. Ministère des ressources naturelles de la faune et des parcs (MRNF). Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière 109, 12 pages.

Prégent, G., Picher, G. et Auger, I., 2010. Tarif de cubage, tables de rendement et modèles de croissance pour les plantations d'épinette blanche au Québec. Mémoire de recherche forestière, 160. Québec : Ministère des Ressources naturelles et de la faune (MRNF), Direction de la recherche forestière, 94 pages.

Régent Instruments Inc., 2003. WinSTEM™ 2003 User's Guide. 29 pages.

Ringo, W.W., et Klem, G.S., 1989. Effect of ring width on density and tracheid length in wood of *Pinus patula*. Ind. J. For. 12(3) : 179-182. dans : Dutilleul, P., Herman, M. et Avella-Shaw, T., 1998. Growth rate effects on correlations among ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce (*Picea abies*). Canadian Journal of Forest Research 28 : 56-68.

Rossi, S., Morin, H., Deslauriers, A. et Plourde, P.Y., 2011. Predicting xylem phenology in black spruce under climate warming. Global Change Biology 17(1) : 614-625.

Rossi, S., Cairo, E. et Krause, C., 2014. Growth and basic wood properties of black spruce along an alti-latitudinal gradient in Quebec, Canada. Annals of Forest Science: 1-11.

Rudolph, T.D. et Laidly, P.R., 1990. Jack pine. In *Silvics of North America : 1, Conifers*, B.H. U.S. Département d'agriculture, handbook 654 : 280-293.

Rune, G., 2003. Slits in container wall improve root structure and stem straightness of outplanted Scots pine seedlings. *Silva Fennica* 37 : 333–342.

Sheedy, G., 1997. La stabilité des plantations : résultats des évaluations réalisées en 1989 et en 1994 dans six plantations de pin gris de l'Abitibi. Québec : Ministère des ressources naturelles, Direction de la Recherche Forestière . Note de recherche forestière 69, 10 pages.

Siostrzonek, E., 1958. More accurate determination of basal area increment with increment boring and log disks. *Forstwissen-schaftliches Centralblatt*, Forestry Science Department, Forest Research Institute 77: 237-254.

Sirois, L. et Payette, S., 1989. Postfire black spruce establishment in subarctic and boreal Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 19(12) : 1571-1580.

Spicer, R., Gartner, B.L. et Darbyshire, R.L., 2000. Sinuous stem growth in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) plantation: growth patterns and wood-quality effects. *Revue canadienne de recherche forestière* 30(5) : 761-768.

Spurr, S.H. et Hyvärinen, M.J., 1954. Wood fiber length as related to position in the tree and growth. *Bot. Rev.* 20(9) : 561-575.

Taylor, F.W., et Burton, J.D., 1982. Growth ring characteristics, specific gravity, and fiber length of rapidly grown loblolly pine. *Wood Fiber* 14(3) : 204-210.

Tong, Q.J. et Zhang, S.Y., 2005. Impact of initial spacing and precommercial thinning on jack pine tree growth and stem quality. *The Forestry Chronicle* 81(3) : 418-428.

Timell, T.E., 1986. Compression wood in gymnosperms. Volumes 1, 2 et 3. Berlin: Springer-Verlag. 2150 pages.

Tremblay, M.J., 2009. Dynamique et croissance de vieux peuplements d'épinettes noires (*Picea mariana*) entre les 51^{ème} et 52^{ème} degrés de latitude nord au Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Département des sciences fondamentales. Chicoutimi, 78 pages.

Tremblay, M.J., Rossi, S. et Morin, H., 2011. Growth dynamics of black spruce in stands located between the 51st and 52nd parallels in the boreal forest of Quebec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(9) : 1769-1778.

Viereck, L.A. et Johnston, W.F., 1990. *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. Black spruce, dans : Burns, R.M. et Honkala, B.H., 1990. *Silvics of North America*, Volume 1, Conifers. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 654, Washington, D.C. 675 pages.

Warensjö, M. et Rune, G., 2004. Stem straightness and compression wood in a 22-year-old stand of container-grown Scots pine trees. *Silva Fennica* 38(2) : 143-153.

WinDendro, 2010. Stem analysis with Winstem. Image Analysis for Plant Science. [En ligne]. <http://www.regentinstruments.com/products/dendro/DENDROStemAnalysis.html> (pages consultées le 11 février 2011).

Zhang, S.Y., Chauret, G., Swift, D.E. et Duchesne, I., 2006. Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. *Revue canadienne de recherche forestière* 36(4) : 945-952.

Zhang, S.Y. et Koubaa, A., 2009. *Les résineux de l'Est du Canada: écologie forestière, caractéristiques, transformations et usages*, Québec. 377 pages.

Zobel, B.J. et van Buijtenen, J.P., 1989. *Wood variation, its causes and control*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.